

Нестационарная теплопередача
через однородную стену.
Инженерный расчет.

Инженер Андониев И.Ю.

Нижний Новгород
2017

Содержание

	Лист
1. Введение.....	2
2. Условные обозначения основных величин	3
3. Метод конечных разностей	4
4. Граничные условия	6
5. Материалы ограждений.....	14
6. Стена бетонная, пример расчета	14
7. Стенка теплоизолированная, пример расчета	21
8. Количество слоев	23
4. Список литературы	24

1. Введение.

В естественных условиях режим теплопередачи через ограждения всегда является нестационарным. Температура наружного воздуха, интенсивность солнечной радиации, сила и направление ветра непрерывно меняются. Температура внутри помещения также изменяется. Ее колебания происходят около некоторых средних значений в пределах отдельных сезонов. Поэтому, несмотря на известную сложность, для правильного расчета теплового режима помещений процесс передачи тепла через ограждения и в элементах систем кондиционирования микроклимата необходимо рассматривать как нестационарный, см. [2], стр.164. Со времен Жана Батиста Фурье методы решения краевой задачи теплопроводности развивались весьма успешно. К настоящему времени создана аналитическая теория теплопроводности, позволившая решить множество инженерных задач. Аналитический аппарат теории теплопроводности сложен и громоздок, а программирование задач для численного решения требует больших затрат времени, оба пути доступны лишь теплотехникам-профессионалам. Тем не менее, в инженерных расчетах можно и нужно использовать достаточно простые формулы см. [4], стр.162. Метод конечных разностей ясно, подробно изложен у Фокина К.Ф. [1], а на стр. 103 дан числовой пример, поэтому эта работа построена по данному источнику.

Цель работы - создать алгоритм для оперативного решения задачи: теплопередача через однородную стену здания, поддержание температуры в помещении при охлаждении или нагревании в зависимости от наружной температуры. Задача выполнена в электронных таблицах Excel.

2. Условные обозначения основных величин .

Исходные

Δz , час - интервал времени;

$t_{\text{в}}$, $^{\circ}\text{C}$ – внутренняя температура;

X , м - толщина стены;

Δx , м - толщина слоя;

ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность материала стены;

λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ - теплопроводность;

c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ - теплоемкость;

$\alpha_{\text{в}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ - коэф теплоотдачи внутренний;

$\alpha_{\text{н}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ - коэф теплоотдачи наружный;

Условие

$$Fo = \alpha \cdot \frac{\Delta z}{\Delta x^2} \leq 0.5$$

$$0.3 \leq Fo \leq 0.5$$

Искомые

$t_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$ – наружная температура;

τ_i , $^{\circ}\text{C}$ – температура слоя;

α , $\text{м}^2/\text{с}$ - коэф температуропроводности;

R_i , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ - термическое сопротивление слоя;

Одномерная задача - движение тепла происходит в одном направлении, например при передаче тепла через плоскую стенку. На стенку поступило тепло в количестве Q_1 . Внутри стенки тонкий слой толщиной dx , температура изменяется на величину dt . При стационарном тепловом потоке температура слоя не изменяется и количество тепла проходящее через слой равно:

$$Q_1 = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

Знак минус поставлен потому, что движение тепла происходит в направлении понижения температуры. При нестационарном режиме величина теплового потока при прохождении через слой будет изменяться. Для определения величины изменения теплового потока по толщине слоя нужно это уравнение продифференцировать по dx , получим:

$$\frac{Q_1}{dx} = -\lambda \frac{d^2t}{dx^2}$$

Изменение величины теплового потока связано с поглощением или выделением тепла слоем при изменении его температуры во времени. Количество поглощенного или аккумулированного тепла Q_2 за промежуток времени dz , будет пропорционально теплоемкости слоя:

$$\frac{Q_2}{dz} = -c \cdot \rho \cdot \frac{dt}{dz}$$

Так как изменение величины теплового потока в слое при отсутствии в нем внутренних источников тепла является следствием только поглощения тепла слоем, величины Q_1 и Q_2 должны быть равны поэтому:

$$\frac{dt}{dz} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{d^2t}{dx^2}$$

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

$$\frac{dt}{dz} = a \cdot \frac{d^2t}{dx^2}$$

Это и есть дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для одномерного движения тепла, где "а" - коэффициент температуропроводности материала стенки. Уравнение показывает, что в каждой точке среды изменение температуры во времени пропорционально пространственному изменению градиента температуры. Чем больше будет величина "а", тем скорее все точки тела при его остывании или нагреве достигнут одинаковой температуры. Решение задачи теплопроводности сводится к решению дифференциального уравнения Фурье, чтобы найти постоянные интегрирования, нужно знать граничные условия. Граничные условия разделяются на временные и пространственные. Временные условия состоят в задании начального распределения температуры в момент времени $z = 0$, **вычисляются из стационарного режима в начальный момент времени**. Пространственные условия относятся к поверхностям, ограничивающим данную среду. Различают три рода граничных условий.

Граничное условие 1 рода - заданы распределение температуры на поверхности и ее изменение во времени. На практике встречается редко.

Граничное условие 2 рода - заданы величины теплового потока на поверхности и его изменение во времени.

Граничное условие 3 рода - заданы температура среды, окружающей поверхность, и закон теплообмена между поверхностью и окружающей средой, т.е. наличие конвективной теплоотдачи поверхности. Наиболее распространенное в практических случаях.

Метод конечных разностей основан на допущении возможности замены непрерывного процесса изменения температуры скачкообразным как в пространстве, так и во времени. При этом дифференциальные уравнения теплопроводности заменяются уравнениями в конечных разностях.

Существует два метода решения уравнения Фурье: явный и неявный методы. Основной недостаток явного численного метода состоит в том, что разностное уравнение должно удовлетворять критерию устойчивости. Чтобы удовлетворить этому критерию, часто приходится выбирать очень малый шаг по времени, а это приводит к возрастанию объема расчетов. Неявный численный метод устойчив при всех величинах шагов по пространству и времени. Однако чем меньше шаги, тем точнее значения температур, поскольку уменьшаются ошибки аппроксимации производных конечными разностями. Существенное преимущество неявного метода - отсутствие критерия устойчивости; его недостаток - необходимость решения системы алгебраических уравнений. При большом числе (10...20) уравнений полезно применить в расчетах методы релаксации или методы обращения матрицы. Задача решается явным методом.

Для нас интересна самая практическая задача - теплопередача через однородную стену дома, кирпичную, деревянную, судовую переборку.

Фокин К.Ф.

Уравнение теплопроводности

$$\frac{dt}{dz} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{d^2 t}{dx^2}$$

в конечных разностях

$$\frac{\Delta \tau}{\Delta z} = a \cdot \frac{\Delta^2 \tau}{\Delta x^2}$$

$\Delta \tau$ - приращение температуры

Δz - приращение времени

Δx - приращение толщины

a - температуропроводность

$n-1$; n ; $n+1$ - слои

$\tau-1$; τ ; $\tau+1$ - температура по слоям

$\Delta^2 \tau$ - есть разность между двумя последующими разностями

$$\Delta^2 \tau = (\tau_{n,z+1} - \tau_{n,z}) - (\tau_{n,z} - \tau_{n-1,z})$$

$$\frac{\tau_{n,z+1} - \tau_{n,z}}{\Delta z} = a \cdot \frac{\tau_{n+1,z} + \tau_{n-1,z} - 2\tau_{n,z}}{\Delta x^2}$$

$\tau_{n,z+1}$ - температура в пл. n в момент $z+\Delta z$

$$\tau_{n,z+1} = \tau_{n,z} + a \cdot \frac{\Delta z}{\Delta x^2} \cdot (\tau_{n+1,z} + \tau_{n-1,z} - 2\tau_{n,z})$$

Последнее уравнение является решением задачи. Исходя из известного начального распределения температур, последовательным применением этого уравнения можно постепенно установить изменение температурного поля.

4. Граничные условия.

Граничное условие 3 рода - заданы температура окружающего поверхность стены воздуха и закон теплообмена между поверхностью и окружающего воздуха и начальное распределение температур внутри стены. Граничные условия это исходные данные для расчета. Температура окружающего воздуха: с одной стороны стены - помещение, с другой окружающая среда.

4.1. Критерий устойчивости.

Критерием устойчивости является число Фурье, $Fo \leq 0,5$ (для нашей задачи должно быть в пределах $Fo = 0.3...0,5$), значение которого должно быть как можно ближе к 0,5. При этом интервал времени для стен из обычных материалов принимается равным $\Delta z = 1$ час, а для тонкой тепловой изоляции $\Delta z = 0.1$ час. Толщину и количество слоев назначать соответственно числу Фурье.

4.2. Температура внутреннего воздуха, задается в зависимости от назначения помещения. Если помещение предназначено для людей, то температура воздуха принимается $t_v = 16...20^{\circ}\text{C}$.

4.3. Температура наружного воздуха.

Температура наружного воздуха в течении дня переменна, значит нужно вычислить суточный ход температуры в необходимый день года. Как это сделать подробно изложено в источнике [9]. Распределения многих метеорологических величин могут быть аппроксимированы нормальным законом и обобщенным нормальным законом. Справочник по климату СССР в 170 томах, охватывает всю территорию России и бывших республик, информация в нем однообразна обработана и представлена для каждого тома. Поэтому из справочных данных можно извлечь цифровые ряды метеорологических величин как случайные числа, практически для любой местности бывшего СССР.

В справочнике [10] в таблице 2.1. приведены многолетние средние месячные и годовые значения температуры воздуха, в городе Горький (Нижний Новгород). В таблице 2.2. приведено среднее квадратическое отклонение средней **месячной** температуры воздуха **см**. В таблице 2.3. приведено среднее квадратическое отклонение средней **суточной** температуры воздуха **сс**. Для Нижнего Новгорода (Горький) по данным этих таблиц составлена таблица 1. В таблице 2 показаны 3 сценария для Нижнего Новгорода: нормальный, аномально теплый и аномально холодный климат. Разность между максимальной и минимальной температурой за сутки - суточная амплитуда. Она является показателем интенсивности суточного хода, см. таблица 3. В таблице 4 представлены три сценария среднесуточных температур на январь месяц. В таблице 5 представлены три сценария суточного хода температур на 6 января, с интервалом в 1 час. На рисунке 1 дан график суточного хода аномально холодной температуры воздуха 6 января.

4.4. Начальное распределение температур внутри стены.

Начальное распределение температур внутри стены определяется в условиях стационарного теплового потока. В каждом слое ограждения температурный перепад пропорционален его термическому сопротивлению Ri , поэтому разность температур внутреннего и наружного воздуха тоже распределяется пропорционально термическим сопротивлениям слоев. Алгоритм вычисления начального распределения температур внутри стены представлен на следующем листе.

Определение начального
распределения температур
в ограждении.

Термическое сопротивление
многослойной панели

$$R_o = R_{\epsilon} + R_1 + R_1 + R_1 \dots + R_n + R_n$$

$$R_o = R_{\epsilon} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots \frac{\delta_n}{\lambda_n} + R_n$$

δ , м - толщина слоя

λ , $\frac{Вт}{м \cdot C^o}$ - теплопроводность

R_{ϵ}, R_n , $\frac{м^2 \cdot C^o}{Вт}$ - сопротивление
теплоотдачи

$R_{\epsilon} = \frac{1}{\alpha_{\epsilon}}$ - внутренний слой

$R_n = \frac{1}{\alpha_n}$ - наружный слой

Температуры в слоях
ограждения

t_n, t_{ϵ} - температуры снаружи и внутри

$$\Delta t = t_{\epsilon} - t_n$$

$$\Delta t_i = \frac{\Delta t \cdot R_i}{R_o}$$

$$t_{вст} = t_{\epsilon} - \Delta t_n$$

$$t_1 = t_{вст} - \Delta t_1$$

$$t_2 = t_1 - \Delta t_2$$

Таблица 1			
Месяц	Тср, °C	σ_m	σ_c
Январь	-11.8	4.1	7.8
Февраль	-11.1	3.6	6.5
Март	-5.0	2.5	5.0
Апрель	4.2	2.5	5.2
Май	12.0	2.3	5.2
Июнь	16.4	2.0	4.5
Июль	18.4	1.8	3.7
Август	16.9	1.8	4.0
Сентябрь	11.0	1.9	4.5
Октябрь	3.6	2.1	4.5
Ноябрь	-2.8	2.2	5.2
Декабрь	-8.9	3.6	7.0

Таблица 2				
Сценарий климата		Норм	А-холодный	А-теплый
Месяц	σ_m	Тср, °C	Т _{ах} , °C	Т _{ат} , °C
Январь	4.1	-11.8	-20.0	-3.6
Февраль	3.6	-11.1	-18.3	-3.9
Март	2.5	-5.0	-10.0	0.0
Апрель	2.5	4.2	-0.8	9.2
Май	2.3	12.0	7.4	16.6
Июнь	2.0	16.4	12.4	20.4
Июль	1.8	18.4	14.8	22.0
Август	1.8	16.9	13.3	20.5
Сентябрь	1.9	11.0	7.2	14.8
Октябрь	2.1	3.6	-0.6	7.8
Ноябрь	2.2	-2.8	-7.2	1.6
Декабрь	3.6	-8.9	-16.1	-1.7

Суточная амплитуда Таблица 3			
Небо	Ясно	Пасмурно	Независимо
Январь	7	5	6
Февраль	8	5	7
Март	9	5	7
Апрель	10	5	8
Май	11	7	10
Июнь	11	6	10
Июль	11	6	10
Август	11	6	9
Сентябрь	11	5	8
Октябрь	8	4	5
Ноябрь	7	4	5
Декабрь	6	4	5

Суточный ход температуры воздуха описывается уравнением гармонических колебаний. Начальная фаза колебаний $z_0 = 180^\circ$, при этом максимум температуры наступает в 14...15 часов дня. После вычислений получим таблицу 5 и график суточного хода температуры см. рисунок 1.

Гармонические колебания

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + t_{cp}$$

Суточный ход

температуры воздуха

$$t_g = \sigma \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z} \cdot z + z_0\right) + t_{cp}$$

σ - стандартное отклонение или

(A - амплитуда колебаний суточной температуры)

Круговая частота

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{Z}$$

$Z = 360^\circ$ - поворот Земли за сутки

$z = 0 \dots 360^\circ$ (1...24ч) - текущий угол поворота Земли

$z_0 = 180^\circ$ - начальная фаза

t_{cp} - средняя температура

Среднесуточные температуры. Таблица 4

Январь	Норм	А-холодный	А-теплый
Дни	Тср, °C	Тах, °C	Тат, °C
1	-8.3	-21.4	3.3
2	-18.9	-27.7	-11.7
3	-10.0	-32.4	7.0
4	-13.6	-9.5	-12.2
5	-8.1	-14.9	6.8
6	-9.1	-19.2	2.7
7	-18.4	-24.0	-4.0
8	-10.9	-10.7	-14.4
9	0.0	-3.4	1.9
10	-17.4	-22.4	-7.9
11	-25.1	-36.2	-5.6
12	-9.1	-22.4	-6.0
13	3.7	-15.9	5.4
14	-9.1	-23.6	-3.4
15	-26.7	-12.1	-3.6
16	-28.7	-28.5	5.8
17	-19.8	-31.3	-14.9
18	-20.6	-31.6	-10.0
19	-10.4	-20.9	-14.1
20	4.4	-22.6	-19.0
21	-11.6	-22.1	0.0
22	-16.2	-18.8	-9.9
23	-12.9	-31.1	-17.3
24	-15.7	-16.2	-19.0
25	-3.4	-24.1	4.5
26	-6.2	-9.2	7.0
27	-3.0	-11.9	8.5
28	-19.2	-13.4	-10.0
29	-8.9	-10.2	10.9
30	-3.5	-17.5	10.9
31	-10.3	-24.5	-6.4

Суточный ход температуры, 6 января, для трех сценариев климата. Таблица 5

6 января		Норм	А-холодный	А-теплый
Град	Час	Тср, °C	Тах, °C	Тат, °C
0	0	-13.1	-23.2	-1.3
15	1	-13.7	-23.8	-1,9
30	2	-14.1	-24.2	-2.3
45	3	-14.0	-24,1	-2.2
60	4	-13.7	-23.8	-1.9
75	5	-13.0	-23.1	-1.2
90	6	-12.1	-22.2	-0.3
105	7	-11.0	-21.1	0.8
120	8	-9.7	-19.8	2.1
135	9	-8.4	-18.5	3.4
150	10	-7.1	-17.2	4.7
165	11	-6.0	-16.1	5.8
180	12	-5.1	-15.2	6.7
195	13	-4.5	-14.6	7.3
210	14	-4.1	-14.2	7.7
225	15	-4.2	-14.3	7.6
240	16	-4.5	-14.6	7.3
255	17	-5.2	-15.3	6.6
270	18	-6.1	-16.2	5.7
285	19	-7,2	-17.3	4.6
300	20	-8.5	-18.6	3.3
315	21	-9.8	-19.9	2.0
330	22	-11,1	-21.2	0.7
345	23	-12.2	-22.3	-0.4
360	24	-13.1	-23.2	-1.3

Суточный ход температуры 6 января, аномально холодно, пасмурно.

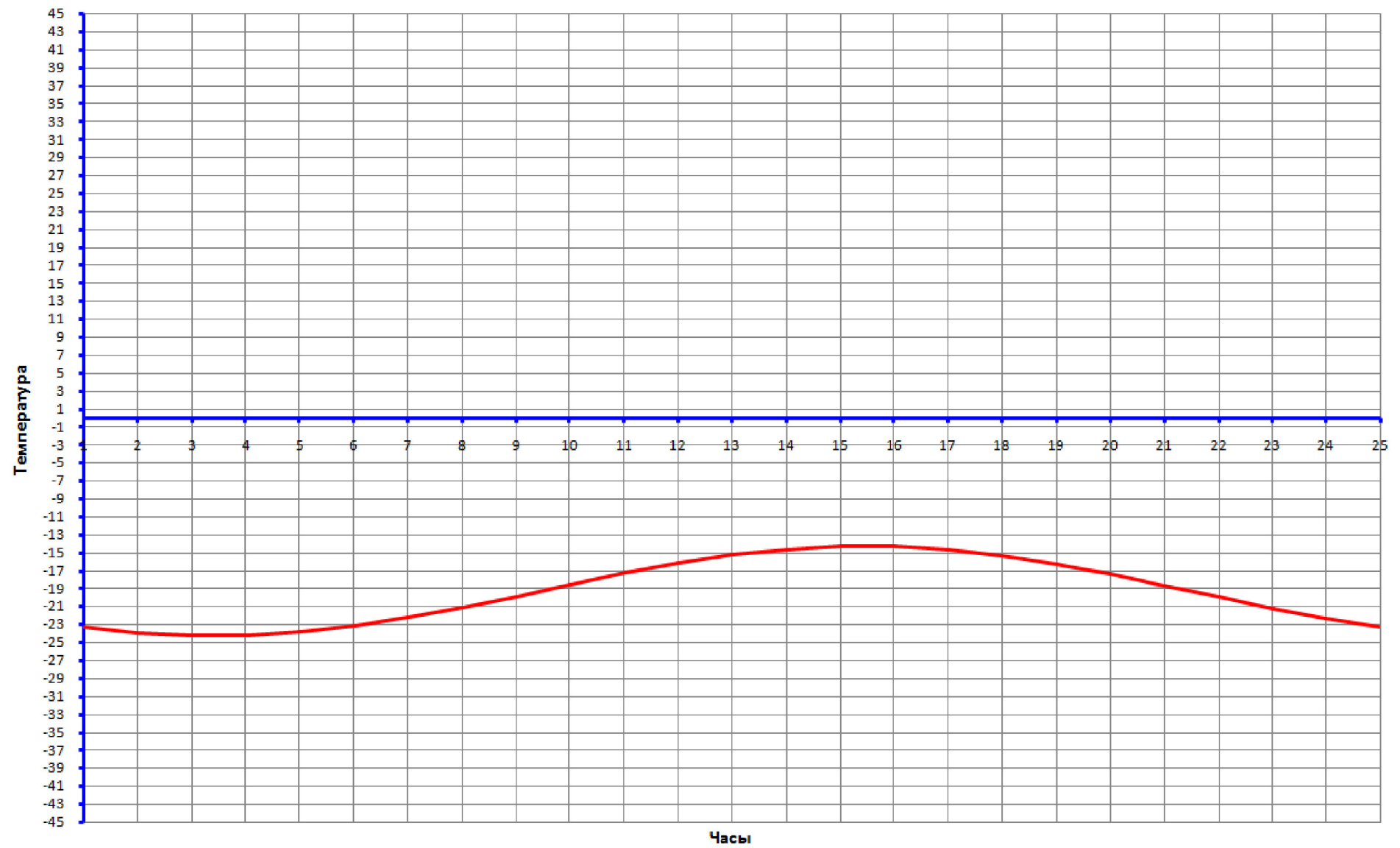


Рисунок 1

5. Материалы ограждений.

В расчете используются самые распространенные материалы для ограждений, характеристики даны для материалов в сухом состоянии. В других случаях нужно использовать характеристики соответствующих материалов.

Толщина стен: кирпич - 250 мм, 380 мм, 510 мм; панели из бетонов - 200 мм, 240 мм, 300 мм, 400 мм; стены деревянные из бруса, бревенчатые - 100 мм, 150 мм, 200 мм, 250 мм.

Судовые ограждения бывают различной конструкций, самая обычная: стальной лист и слой теплоизоляции: базальтовая (каменная) вата, минеральная вата, пенопласт и т.д. Толщина судовых переборок - 50 мм, 80 мм, 100 мм, 160 мм. Теплотехнические показатели строительных материалов даны в таблице 6 по СНиП II-3-79.

Обозначения в таблице 6:

ρ , кг/м³ - плотность в сухом состоянии;

λ , Вт/(м^{°C}) - коэффициент теплопроводности в сухом состоянии;

c , Дж/(м^{°C}) - теплоемкость в сухом состоянии.

6. Стена бетонная, пример расчета.

Задача: поддержание температуры в помещении при охлаждении или нагревании в зависимости от наружной температуры.

Температура наружного воздуха в течение суток изменяется по сценарию аномально холодного климата, см. таблица 4, (6 января) и таблица 5. Наружное ограждение состоит из пено- или газобетона толщиной 250 мм. Определить изменение температуры внутренней поверхности стены. Исходные данные представлены в таблице 6. В таблице 7 вычисление начального распределения температур внутри стены.

Исходные данные.	Таблица 7
Интервал времени, час	1
Число слоев	5
Толщина стены, м	0.25
Газобетон, плотность, кг/м ³	1000
Теплопроводность, Вт/(м ^{°C})	0.29
Теплоемкость, Дж/(кг ^{°C})	840
Кэф теплоотдачи от внутреннего воздуха к стене, α_v , Вт/(м ² °C)	8.0
Кэф теплоотдачи от стены к наружному воздуху, α_k , Вт/(м ² °C)	40.0
Внутренняя температура, °C	18

Множественными проверками установлено, что коэффициенты конвективной теплоотдачи ничтожно влияют на результаты, поэтому приняты значения $\alpha_v = 8$, Вт/(м²°C) и $\alpha_k = 40$, Вт/(м²°C).

Теплотехнические показатели строительных материалов СНиП II-3-79. Таблица 6

Наименование	Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м°С)	c , Дж/(м°С)
Стены	Железобетон	2500	1.690	840
Стены	Кирпич красный	1800	0.560	880
Стены	Кирпич силикатный	1800	0.700	880
Стены	Керамзитобетон	1800	0.660	840
Стены	Газобетон	1000	0.290	840
Стены	Пенобетон	1000	0.290	840
Стены	Стекло оконное	2500	0.760	840
Дерево	Сосна, осина	550	0.090	2300
Дерево	Дуб, бук, ясень	750	0.090	2300
Изоляция	Минвата	200	0.064	840
Изоляция	Пенопласт	125	0.052	1260
Изоляция	Пенопласт формальдегидный	100	0.047	1680
Изоляция	Пенополистирол	150	0.050	1340
Изоляция	Пенополиуретан	80	0.041	1470
Изоляция	Базальтовая (каменная) вата	250	0,034	1320
Металл	Алюминий	2600	221	840
Металл	Сталь арматурная	7850	58	480
Металл	Медь	8500	407	420
Кровля	Асфальтобетон	2100	1,05	1680
Кровля	Битум	1400	0,27	1680
Кровля	Гравий керамзитовый	800	0,35	840
Кровля	Песок строительный	1600	0,35	840
Кровля	Рубероид	600	0,17	1680
Отделка	ДСП	600	0,11	2300
Отделка	ДВП	1000	0,15	2300
Отделка	Линолеум	600	0,17	1680
Отделка	Линолеум многослойный	1800	0,38	1470
Отделка	Асбоцемент листовой	1600	0,38	1470
Отделка	Фанера	600	0,12	2300

Начальные вычисления. Таблица 8	
Наружная температура, °C	-23.2
Сопротив теплоотдачи внутр поверх R_v	0.125
Сопротив теплоотдачи наруж поверх R_n	0.025
Козэф температуропроводности	0.00124
Температурный перепад Δt , °C	41.20

Термическое сопротивление слоев .		Таблица 9	
Сопротивление		Δt	Слои, м
Сопротивление внутренней поверхности Rв	0.125	5.100	0.000
Слой 1-2 R1	0.172	7.000	0.050
Слой 2-3 R2	0.172	7.000	0.100
Слой 3-4 R3	0.172	7.000	0.150
Слой 4-5 R4	0.172	7.000	0.200
Слой 5-6 R5	0.172	7.000	0.250
Сопротивление наружной поверхности Rн	0.025	1.000	
Сопротивление теплопередачи стены R0	1,012		
Темп внутренней поверхности стены (1)	12.9		
Температура на границе 2 слоя	5.9		
Температура на границе 3 слоя	-1.1		
Температура на границе 4 слоя	-8.1		
Температура на границе 5 слоя	-15.2		
Температура наружной поверхности стены	-22.2		

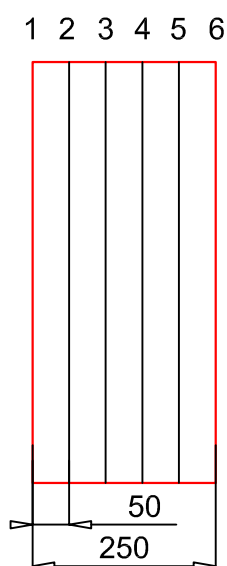


Рисунок 2

Заполнение первой строки. Таблица 10								
Интервал	Слой	1	2	3	4	5	6	
z, час	tв, °C	0	50	100	150	200	250	tн, °C
0	18	12.9	5.9	-1.1	-8.1	-15.2	-22.2	-23.2
1	18							-23.8
2	18							-24.2
3	18							-24,1

Теперь заполняется вторая строка .

Температура поверхности 1

$$\tau_{1,z+1} = \frac{\alpha_g \cdot t_g + \frac{\lambda}{\Delta x} \tau_{2,z}}{\alpha_g + \frac{\lambda}{\Delta x}}$$

$$\tau_{2,z+1} = \tau_2 + a \frac{\Delta z}{\Delta x^2} (\tau_1 + \tau_3 - 2 \cdot \tau_2)$$

$$\tau_{3,z+1} = \tau_3 + a \frac{\Delta z}{\Delta x^2} (\tau_2 + \tau_4 - 2 \cdot \tau_3)$$

$$\tau_{4,z+1} = \tau_4 + a \frac{\Delta z}{\Delta x^2} (\tau_3 + \tau_5 - 2 \cdot \tau_4)$$

$$\tau_{5,z+1} = \tau_5 + a \frac{\Delta z}{\Delta x^2} (\tau_4 + \tau_6 - 2 \cdot \tau_5)$$

Температура поверхности 6

$$\tau_{1,z+1} = \frac{\alpha_k \cdot t_{h,z+1} + \frac{\lambda}{\Delta x} \tau_{5,z+1}}{\alpha_k + \frac{\lambda}{\Delta x}}$$

Температура внутренней поверхности 1

$$\tau_{1,z+1} = \frac{8 \cdot 18 + \frac{0,29}{0,05} \cdot 5,9}{8 + \frac{0,29}{0,05}} = 12,9$$

$$\tau_{2,z+1} = 5,9 + 0,00124 \frac{1}{0,05^2} (12,9 + (-1,1) - 2 \cdot 5,9) = 5,9$$

$$\tau_{3,z+1} = (-1,1) + 0,00124 \frac{1}{0,05^2} (5,9 + (-8,1) - 2 \cdot (-1,1)) = -1,1$$

$$\tau_{4,z+1} = (-8,1) + 0,00124 \frac{1}{0,05^2} ((-1,1) + (-15,2) - 2 \cdot (-8,1)) = -8,1$$

$$\tau_{5,z+1} = (-15,2) + 0,00124 \frac{1}{0,05^2} ((-8,1) + (-22,2) - 2 \cdot (-15,2)) = -15,2$$

Температура наружной поверхности 6

$$\tau_{1,z+1} = \frac{40 \cdot (-23,8) + \frac{0,29}{0,05} (-15,2)}{40 + \frac{0,29}{0,05}} = -22,7$$

Заполнение второй строки. Таблица 11

Интервал	Слой	1	2	3	4	5	6	
z, час	тв, °С	0	50	100	150	200	250	тн, °С
0	18	12.9	5.9	-1.1	-8.1	-15.2	-22.2	-23.2
1	18	12,9	5,9	-1,1	-8,1	-15,2	-22,7	-23.8
2	18							-24.2
3	18							-24,1

Последующие строки заполняются аналогично, таким образом заполнив всю таблицу можно установить изменение температурного поля, см. таблица 12. Затем по таблице для наглядности необходимо построить диаграмму, на ней показать наружную температуру, внутреннюю и температуру внутренней поверхности стены. На рисунке 3 диаграмма построенная по таблице 12, на рисунке 4 показана диаграмма при нарушении критерия устойчивости (таблица 12 количество слоев 6).

Расчетная таблица. Таблица 12

Интервал	Слой	1	2	3	4	5	6	
z, час	tв, °C	0	50	100	150	200	250	tн, °C
0	18	12.9	5.9	-1.1	-8.1	-15.2	-22.2	-23.2
1	18	12.9	5.9	-1.1	-8.1	-15.2	-22.7	-23.8
2	18	12.9	5.9	-1.1	-8.1	-15.4	-23.1	-24.2
3	18	12.9	5.9	-1.1	-8.3	-15.6	-23.1	-24.1
4	18	12.9	5.9	-1.2	-8.4	-15.7	-22.8	-23.8
5	18	12.9	5.9	-1.2	-8.4	-15.6	-22.2	-23.1
6	18	12.9	5.8	-1.3	-8.4	-15.3	-21.3	-22.2
7	18	12.9	5.8	-1.3	-8.3	-14.9	-20.3	-21.1
8	18	12.9	5.8	-1.2	-8.1	-14.3	-19.1	-19.8
9	18	12.9	5.8	-1.1	-7.8	-13.6	-17.9	-18.5
10	18	12.9	5.9	-1.0	-7.4	-12.8	-16.7	-17.2
11	18	12.9	5.9	-0.7	-6.9	-12.0	-15.6	-16.1
12	18	12.9	6.1	-0.5	-6.4	-11.2	-14.7	-15.2
13	18	13.0	6.2	-0.2	-5.9	-10.5	-14.0	-14.6
14	18	13.1	6.4	0.2	-5.4	-10.0	-13.7	-14.2
15	18	13.1	6.6	0.5	-4.9	-9.5	-13.7	-14.3
16	18	13.2	6.8	0.9	-4.5	-9.3	-13.9	-14.6
17	18	13.3	7.0	1.2	-4.2	-9.2	-14.5	-15.3
18	18	13.4	7.2	1.4	-4.0	-9.4	-15.3	-16.2
19	18	13.5	7.4	1.6	-4.0	-9.7	-16.4	-17.3
20	18	13.5	7.5	1.7	-4.0	-10.2	-17.5	-18.6
21	18	13.6	7.6	1.7	-4.2	-10.8	-18.8	-19.9
22	18	13.6	7.7	1.7	-4.5	-11.5	-19.9	-21.2
23	18	13.7	7.7	1.6	-4.9	-12.2	-21.0	-22.3
24	18	13.7	7.6	1.4	-5.3	-13.0	-21.9	-23.2

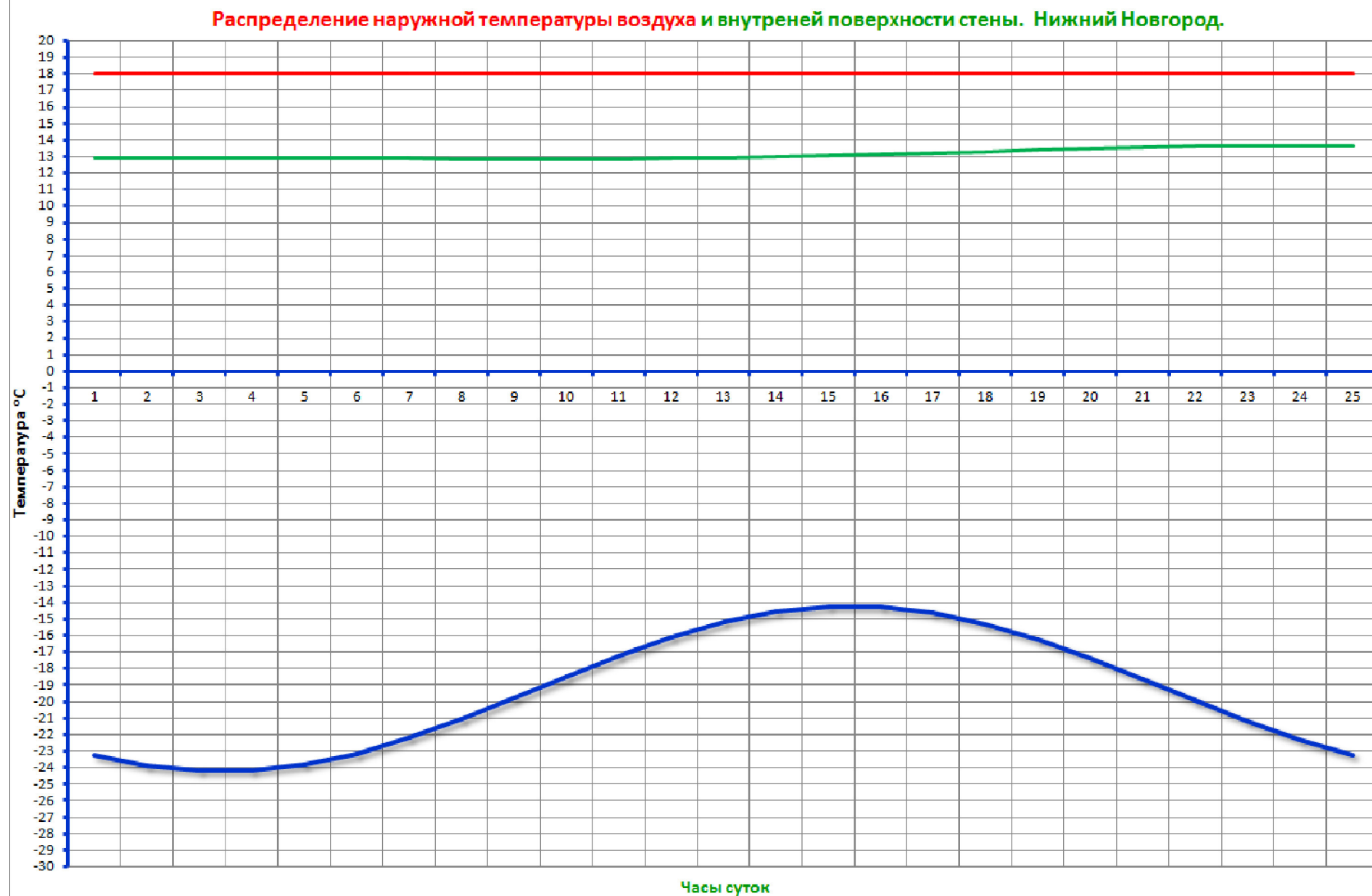


Рисунок 3

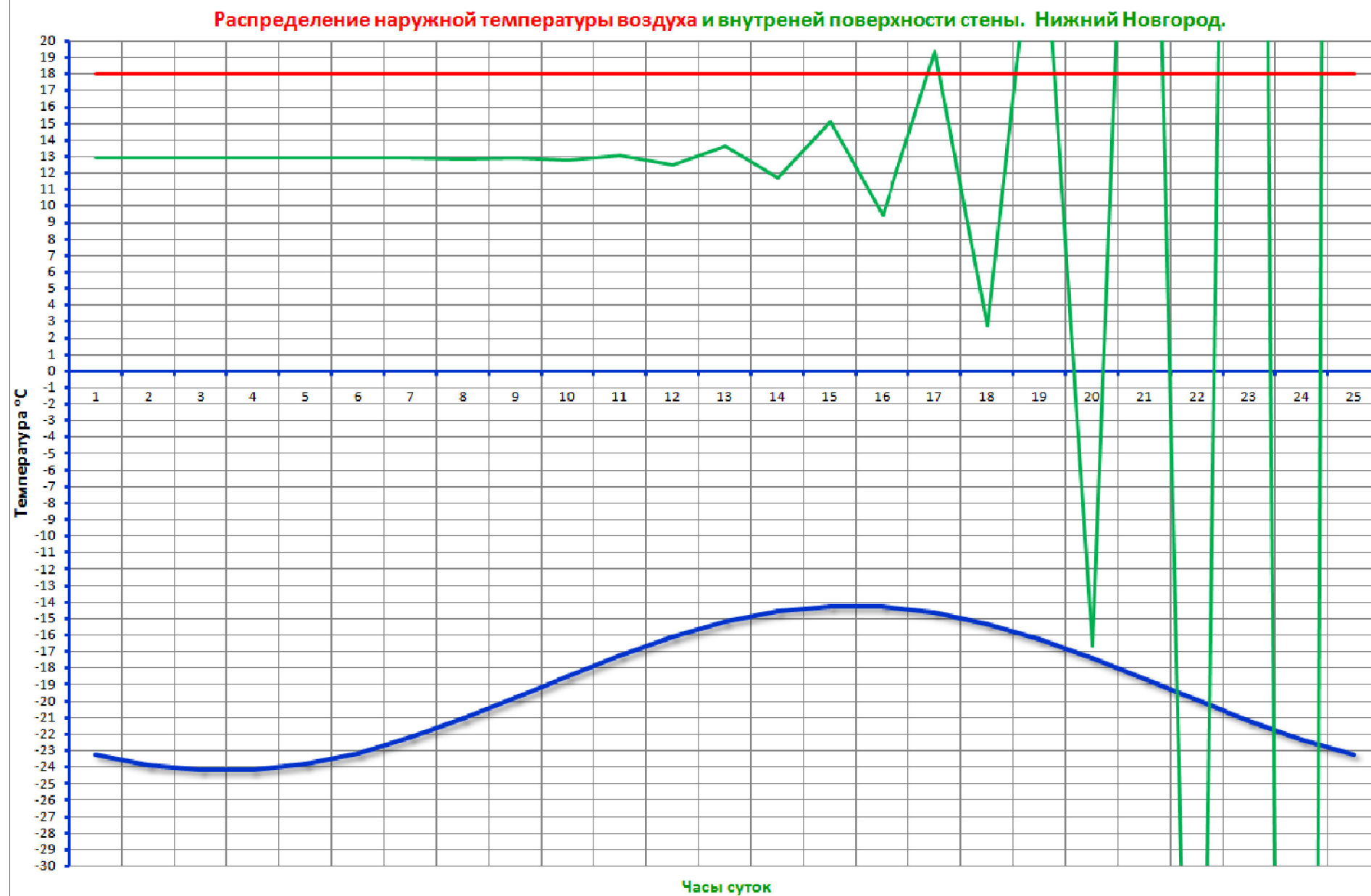


Рисунок 4

7. Стенка теплоизолированная, пример расчета.

Конструкция теплоизолированных стенок обычно состоит из покровного слоя и слоя изоляции. Покровный слой выполняется из различных материалов. Холодильные камеры сборно-разборного типа представляют собой конструкцию из сэндвич-панелей которые имеют соединение типа "шип-паз". Сэндвич-панели изготавливаются из теплоизолирующих материалов и стали. В качестве наполнителя сэндвич-панели используется пенополиуретан, минеральная вата (базальтовое волокно). В качестве покрытия используется сталь толщиной 0,5 мм. Толщина теплоизоляции, мм: 20, 40, 60, 80, 100.

В судостроении также применяется теплоизоляция в конструкциях: бортов, переборок, днищ, палуб, для создания комфортных условий на борту. Путем выбора правильного изоляционного решения, можно получить оптимальную температуру на борту и сокращения энергопотребления.

Обычно термическое сопротивление покровного слоя ничтожно и в расчетах тепловой изоляции не учитывается, [5].

Задача: **поддержание температуры в помещении при охлаждении или нагревании в зависимости от наружной температуры.** Чтобы соблюдался критерий устойчивости, для тонкой изоляции, интервал времени принимается равным 0,1 часа. Задача решается при тех же условиях.

Наружное ограждение представляет собой судовую наружную переборку, изоляция - базальтовая (каменная) вата, толщина 35 мм. Определить изменение температуры внутренней поверхности стены. Исходные данные представлены в таблице 13. На рисунке 5 представлена диаграмма расчета судовой теплоизолированной переборки.

Исходные данные.	Таблица 13
Интервал времени, час	0.1
Число слоев	4
Толщина стены, м	0.035
Базальтовая вата, плотность, кг/м ³	250
Теплопроводность, Вт/(м ^{°C})	0.03
Теплоемкость, Дж/(кг ^{°C})	1320
Кэф теплоотдачи от внутреннего воздуха к стене, $\alpha_{в}$, Вт/(м ² °C)	8.0
Кэф теплоотдачи от стены к наружному воздуху, $\alpha_{к}$, Вт/(м ² °C)	40.0
Внутренняя температура, °C	18

Множественными проверками установлено, что коэффициенты конвективной теплоотдачи ничтожно влияют на результаты, поэтому приняты значения **$\alpha_{в} = 8, \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}$** и **$\alpha_{к} = 40, \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}$** .

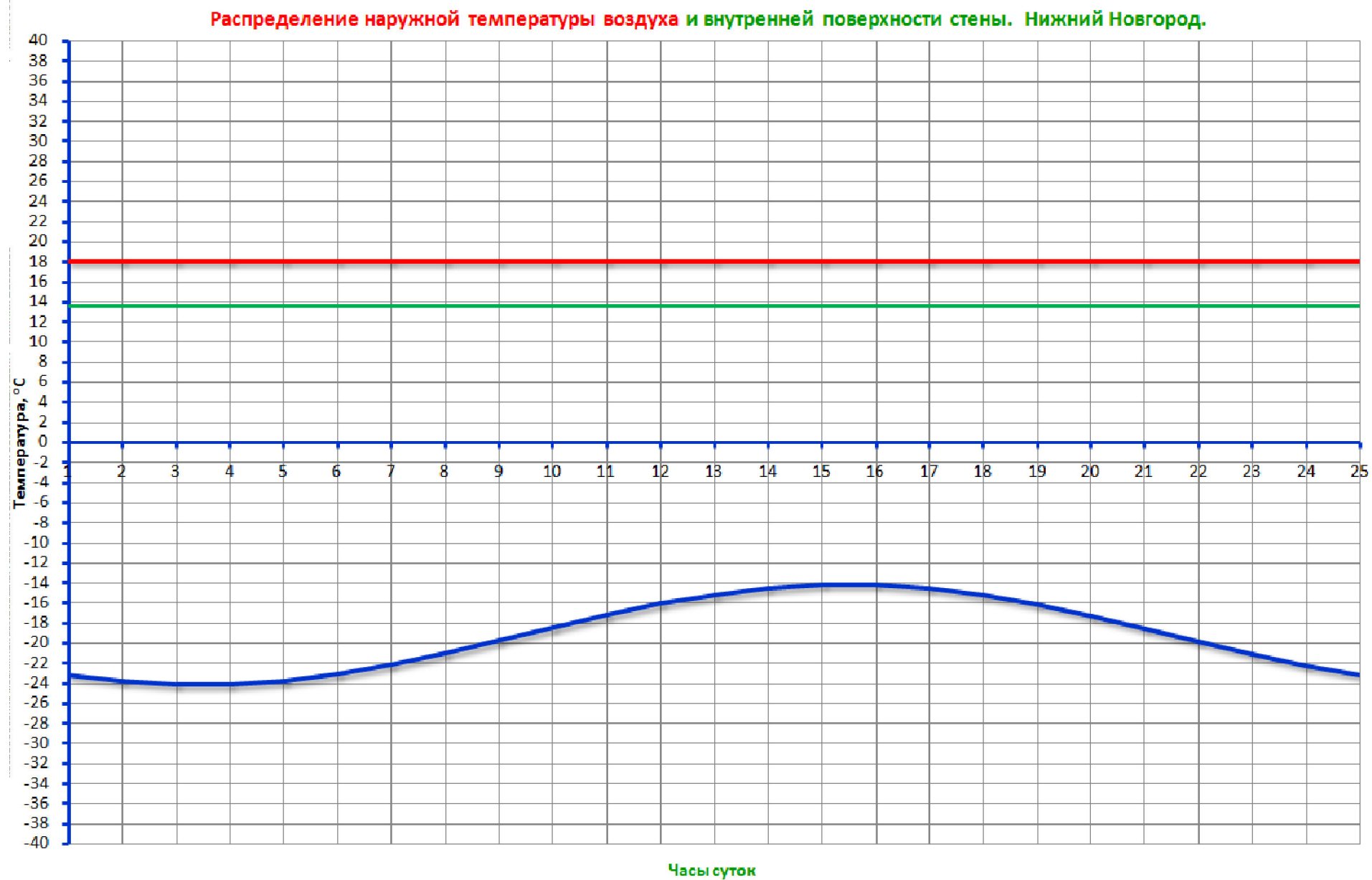


Рисунок 5

8. Количество слоев.

В таблице 14 указано количество слоев для стен из материалов в таблице 6, чтобы выполнялся критерий устойчивости.

Таблица 14			
Материал	Толщина стены, мм	Слои, шт	Интервал времени, ч
Кирпич	150, 200, 240	3...4	1
Кирпич	250, 300	5...6	
Кирпич	350, 450	7...8	
Кирпич	500, 600	9...10	
Кирпич	550, 750	11...12	
Дерево	63, 70, 100, 120	3...4	
Дерево	110, 150, 200	5...6	
Дерево	155, 160, 200, 250	7...8	
Дерево	200, 220, 250, 300	9...10	
Дерево	250, 300, 350	11...12	
Изоляция	72, 100, 110	3...4	
Изоляция	135, 165, 200	5...6	
Изоляция	22, 30, 35, 40, 50	3...4	0,1

Список литературы

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий . Стройиздат М. 1973.
2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика . М. Высшая школа 1982.
3. Мачинский В.Д. Теплопередача в строительстве . Гостройиздат М. 1939.
4. Китанин Э.Л. Техническая термодинамика и теплопередача . СПбГТУ. 1999.
5. Хижняков С.В. Практические расчеты тепловой изоляции . М. Энергия. 1976.
6. Эккерт Э.Р. Теория тепло- и массообмена. М. Госэнергоиздат. 1961.
7. Крейт Ф. Основы теплопередачи . М. Мир. 1983.
8. Михеев М.А. Основы теплопередачи . М. Энергия. 1977.
9. Андониев И.Ю. Генерация значений температуры наружного воздуха . Справочник по климату СССР. Инженерный расчет. Нижний Новгород. 2017.
10. Научно-прикладной справочник по климату СССР . Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 29. Кировская, Костромская, Ярославская, Ивановская, Владимирская, Горьковская, Рязанская области, Удмуртская, Марийская, Чувашская, Мордовская АССР. Санкт-Петербург Гидрометеоиздат 1992.